

## 준설시험루프를 이용한 모래-물 혼합물 배송에 관한 연구

### A Study of Hydraulic Transport of Sand-water Mixture by a Dredging Test Loop

이만수<sup>1)</sup>, Mansoo Lee, 박영호<sup>2)</sup>, Youngho Park, 이영남<sup>3)</sup>, Youngnam Lee, 정충기<sup>4)</sup>, Choongki Chung

1) 현대건설 기술연구소 차장, Deputy-chief Researcher, Dept. of Civil Eng., HICT

2) 현대건설 기술연구소 부장, Chief Researcher, Dept. of Civil Eng., HICT

3) 현대건설 기술연구소 소장, President, Hyundai Institute of Construction Technology

4) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil Urban & Geosystem Eng. Seoul National University

**SYNOPSIS** : The efficiency of the hydraulic transport of soil-water mixtures is an important factor in designing and operating a pump & pipeline system and is directly connected with dredging cost and working period. However, the hydraulic transport mechanism in the slurry flow inside the pipeline such as frictional losses, specific energy consumption, deposition velocity has not been well established.

In this study a new dredging test loop system was designed and built. It is composed of a slurry pipeline with pipes of different diameters, a centrifugal slurry pump and a diesel engine connected with the slurry pump. and equipped with modern measuring facilities that enable to measure all important characteristics of a transportation system. The objective of this paper is to discuss the efficiency of the hydraulic transport of the Jumoonjin sand-water mixtures in the dredging test loop and to present simple equations induced from the test results of the loop that can express the transport product and the transport productivity.

**Key words** : hydraulic transport, dredging test loop, sand-water mixture, concentration, transport efficiency

## 1. 서 론

국내뿐만 아니라 세계 도처에서 매립토를 얻거나 항로·항만의 수심확보를 위해 방대한 토량이 물과 혼합물의 형태로 준설되고 있다. 준설된 흙과 물의 혼합물을 배송관을 이용하여 배송할 때, 효율적인 배송은 공사 비용과 작업 기간에 밀접하게 관련되므로 매우 중요하다. 준설현장에서 배송효율을 높이기 위해서는 각 배송조건에서 배송 소모동력과 배송 생산량에 대한 분석이 필요하다. 그러나 흙의 종류, 해상 조건, 동원된 준설장비 등이 준설 현장마다 동일하지 않기 때문에 어려움이 있다.

흙과 물 혼합물의 배송에 대해 Wilson 등(1882, 1997), Gillies(1993), Herbich(1992), Matousek(1997), Lee 등(2003) 등과 미 공병단, IHC, Georgia Iron Work 등에서는 20 여 년 동안 연구하고 있으나, 국내에서는 여러 건설 회사들이 인천, 부산, 광양 등과 동남아시아, 중동 등 여러 지역에서 준설공사를 수행하였음에도 불구하고, 이에 대한 체계적인 연구가 거의 전무하여 준설 현장에서는 준설토의 종류에 따라 간편하게 개략적으로 제시된 기준(Bray 등, 1997)과 현장 시운전 경험으로 배송 속도와 농도를 결정하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 디젤엔진 및 슬러리 원심펌프, 싸이크론(cyclone) 탱크, 아크릴 투명관이 설치된 다중 배송관 시스템과 유량계, 밀도계, 압력 센서 등 계측장치로 구성된 준설시험루프를 이용하여 주문진 표 준사-물 혼합물을 배송 시험한 결과로부터 배송농도, 속도와 배송 생산량, 소모 동력관계를 분석하고 효율적인 배송 방법을 알아보았다. 그리고 준설시험루프 시험결과를 분석하여 펌프의 회전수와 배송농도를 변수로 배송 생산량, 배송 소모 동력대비 배송 생산량을 예측할 수 있는 간편한 식을 제안하였다.

## 2. 준설시험루프의 구성 및 시험 계획

### 2.1 준설시험루프의 구성

준설선을 이용한 현장 배송시험으로는 흙의 종류, 배송농도, 배송속도 등을 일정하게 유지·조절할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 배송조건을 임의로 조절할 수 있는 준설시험루프를 제작, 설치하였다. 사용된 준설시험루프는 크게 동력장치, 배송관, 계측 시스템으로 나눌 수 있다.

일정 회전수-토크 조절 가버너(governor)와 과급기(turbo charger)가 장착된 340 마력(hp) 산업용 디젤엔진과 분당 최대 15 m<sup>3</sup> 를 송수할 수 있는 크롬강 슬러리 원심펌프를 준설시험루프에 설치하였다. 디젤엔진 동력은 변속기어 없이 클러치와 V 벨트로 펌프와 연결되며, 엔진과 펌프는 통제실에서 원격으로 조정된다. 펌프는 분당 540 - 2,000 회전까지 조절할 수 있다.

배송관 시스템은 총 연장이 234 m 이고, 수직관, 수평관, 곡관, 싸이크론 탱크와 배송 혼합물의 흐름을 변경 또는 조절할 수 있는 13 개의 주 조절 밸브들로 구성되어 있다. 수직관은 직경이 204 mm 원형관으로 길이가 70D(D는 배송관 직경)인 수직 U 자형 루프이고 펌프 토출구에 가장 가까이 위치한다.

수평관은 네 종류이며, 직경 155 mm 길이 120D인 원형관, 직경 204 mm 길이 150D인 원형관, 직경이 305 mm 길이 75D인 원형관, 그리고 길이 14 m 인 200 mm 정사각형관으로 구분된다. 곡관은 직경이 204 mm 인 수평 원형관으로 각도는 45°, 90°, 135° 등 세 종류이다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 준설시험루프의 배치를 보여주고 있다. 주문진 표준사를 저장하거나 공급하는 싸이크론 탱크는 직경이 2 m, 용량은 6 m<sup>3</sup> 이고 5 개의 조절밸브를 가지고 있으며 펌프 흡입구 측에 설치되어 있다. 각 수평 원형관과 싸이크론 탱크 밸브하부에는 각각 길이가 80 cm와 15 cm 인 아크릴 투명관이 설치되어 표준사 혼합물의 흐름을 육안 관찰하거나 디지털 카메라로 촬영할 수 있다. 그림 2는 준설시험루프의 수평 배송관과 싸이크론 탱크 전경을 보여준다.

준설시험루프에서 사용되는 계측기의 종류는 펌프의 회전수, 밀도, 유량, 압력, 차압 센서 등 5 종이고, 총 수량은 14 개이다. 데이터 습득 장치는 2 개이다.

절대압력과 차압(2 m 거리)을 측정하기 위해 밸브 또는 곡관 하류로부터 45D 또는 70D 위치에 총 49 개의 직경이 3 mm인 탭(BS1042S)이 설치되어 있다. 펌프 회전수는 벨트 풀리에 설치된 광 근접센서와 타코미터(tachometer)로 측정하였다. 배송 혼합물의 밀도는 수직관 상류 또는 수평관에서 세슘(Cs137) 방사능 동위원소 밀도계로 측정하였고, 유량은 수직관 하류에서는 마그네틱 유량계, 수평관에서는 스펙트라 초음파 유량계로 측정하였다.

절대압력은 펌프 흡입구, 토출구와 차압을 측정하는 2 개소에서 용량 1,700 kPa 압력센서와 GDS사 디지털 압력조절기로 측정하였고, 차압은 용량 7 kPa 차압센서로 측정하였다. 그리고 압력과 차압 측정값들의 신뢰성을 검증, 확인하기 위하여 절대압력 마노미터와 차압 마노미터를 측정센서와 병렬로 설치하였다.

각 측정값들은 자동 계측되며, 신호잡음과 간섭을 방지하기 위해 잡음(Noise) 필터와 두개의 데이터 로거를 사용하였다. 시험 전에 계측시스템의 정확도, 정밀도에 대한 검증을 실시한 후, 반복성과 재현성을 확인하였다. 배송시험 중 측정된 각 계측 값들은 데이터 로거를 통해 컴퓨터로 실시간 저장된다.

### 2.2 시험 모래

압축강도 시험용 표준사 2 톤을 염분과 부유물을 제거한 후, 싸이크론 탱크에 넣어 배송모래로 사용하였다. 주문진 표준사의 비중(Gs)는 2.65 이고, d<sub>50</sub>은 0.54 mm, d<sub>85</sub>는 0.73 mm, 균등계수(c<sub>u</sub>)는 1.53, 곡률계수(c<sub>v</sub>)는 0.91이다. 그림 3은 주문진 표준사의 입도분포곡선과 전자 현미경 사진을 보여주고 있다.

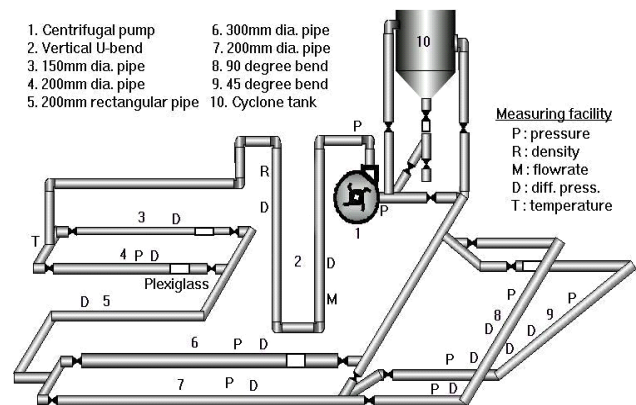


그림 1. 준설시험루프개요도

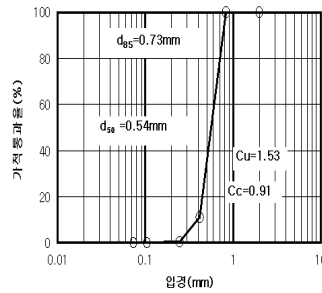


a) 수평 배송관

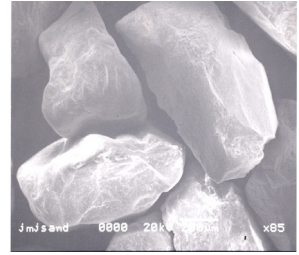


(b) 싸이크론 탱크

그림 2. 준설시험루프 배송관과 싸이크론 탱크



(a) 입도분포 곡선



(b) 전자현미경 사진

그림 3. 표준사의 입도분포 곡선과 전자현미경 사진

### 2.3 시험 방법 및 시험 계획

준설시험루프를 이용한 배송시험은 다음과 같은 순서로 진행된다.

모든 계측기의 보정과 영점 조정 후, 배송관 시스템을 상수로 채우고, 송수를 시작하기 전에 각 계측기의 초기값을 측정한다. 물을 송수할 때의 유량, 밀도와 각 위치에서의 절대압력, 차압을 펌프 회전수를 조절하여 유량을 변화시키면서 측정한다.

주문진 표준사를 배송관내에 주입할 때에는 싸이크론 탱크하부에 설치된 아크릴 투명관을 관찰하면서 탱크하부 밸브를 서서히 열어 배송관 내의 물과 모래 혼합물 슬러리 밀도가 균일하도록 조절한다. 밀도계를 관측하여 목표 배송 밀도에 도달하면 싸이크론 탱크하부 밸브를 잠근다. 전체 배송관 시스템을 통해 혼합물을 약 100회 회전시켜 배송관 내 모래 분포의 균일성을 확보한다. 균일성이 확인되면, 본 실험으로서 30 회전 동안 혼합물을 배송하면서 밀도, 유량, 배송관 각 위치에서 절대압력, 차압들을 측정한다. 펌프의 회전수는 저속에서 고속으로 조절하고, 혼합물의 농도는 저농도에서 고농도로 조절한다.

배송 시험이 끝난 후, 혼합물을 싸이크론 탱크 상부로 흐르게 하여 싸이크론 원리와 유속 저하로 모래를 탱크 내에 침강하도록 하여 배송 모래를 배송관에서 배출한다.

펌프의 분당 회전수를 약 540 에서부터 각 단계별로 100 정도씩, 10 단계로 1,480 까지 증가시켜 배송유량(배송속도)를 조절하였다. 이를 속도로 환산하면 2.6 m/s - 8 m/s 범위이다. 배송 농도는 약 3 %, 7 %, 12 %, 20 % 등 총 4 단계로 나누어 시험하였다. 본 논문에서 분석한 시험 조건들을 표 1 에 요약하였다.

배송속도 2.5 m/s 이하에서는 흐름 영역(Flow regime)을 고려 할 때, 배송관내 침전 현상이 발생할 가능성이 있으므로 시험범위에 포함하지 않았다.

표 1. 시험 요약

배송 종류	밀도(t/m <sup>3</sup> )	농도(%)	펌프의 분당 회전수(rpm)									
			534	644	723 (731)	860 (899)	926	969 (978)	1,121	1,196 (1,211)	1,353	1,400(1,434)
물	1	0	534	644	723 (731)	860 (899)	926	969 (978)	1,121	1,196 (1,211)	1,353	1,400(1,434)
표준사-물 혼합물	1.055	3.3	536	656	731 (755)	851	950 (978)	1,051	1,143	1,265	-	1,400
	1.119	7.2	536	649	762	849	953	1,053	-	-	-	1,400(1,480)
	1.204	12.4	536	649	-	850	954	1,067	1,154	1,262	1,364	1,400(1,463)
	1.327	19.8	537	650	-	850	970	1,055	1,166	1,258	1,364	1,400(1,430)

### 3. 결과 분석

원심펌프의 회전수 변화와 배송유량, 마노메트릭 수두(펌프 토출구 수두-펌프 흡입구 수두+ 측정 위치 수두차), 펌프 소모 축동력(break horse power)의 특성은 식 (1), (2), (3)으로 표현된다. 식 (1), (2), (3)에서 Q는 유량(m<sup>3</sup>/min)이고, H는 마노메트릭 수두(m)이고, P는 펌프 축동력()이고, N은 펌프의 회전

수(rpm)이다. 배송유량은 펌프 회전수비에 비례하여 증가하고, 마노메트릭 수두는 펌프 회전수비의 제곱에 비례하여, 소모 축동력은 펌프 회전수비의 세제곱에 비례하여 증가한다. 그러나 흙-물 혼합물을 배송할 경우에는 혼합물의 농도가 변화하면 그 비중과 펌프 효율의 변화, 그리고 배관시스템에서 발생하는 마찰 손실과 흐름 영역의 변화 등의 영향으로 상기의 식들만으로 원심 펌프 및 배송시스템의 특성과 효율적인 운전방법을 설명할 수 없다.

본 논문의 목적은 주문진 표준사-물 혼합물을 준설시험루프를 이용하여 배송 시험한 결과로부터 배송 농도와 배송속도의 변화가 배송 생산량과 배송소모동력에 미치는 영향을 분석하고 효율적인 배송조건을 알아보는데 있다. 그리고 배송 생산량과 배송소모동력, 단위 소모 마력당 배송 생산량을 배송농도와 펌프의 회전수로서 표현하는 간략식을 제시하였다.

$$Q_2 = Q_1 \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (1)$$

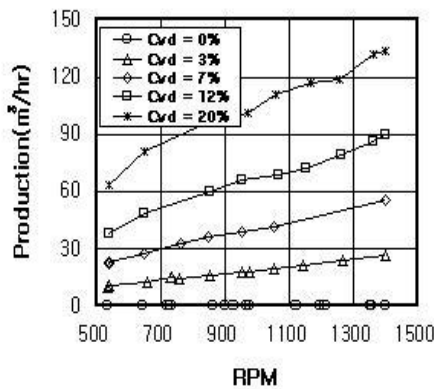
$$H_2 = H_1 \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \quad (3)$$

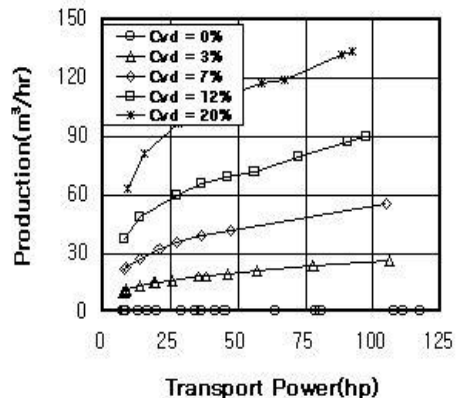
### 3.1 시험 결과

#### 3.1.1 펌프의 회전수와 배송 생산량, 배송 소모동력

그림 4(a)는 펌프의 회전수와 배송 생산량 관계를 보여주고 있다. 펌프 회전수와 농도가 증가하면 배송 생산량이 증가하였다. 펌프가 저속 운전될 때, 소모동력 20 마력 증가는 배송 생산량을 약 50 % 증가시키며, 배송 생산량 증가율은 부피농도가 3 %일 때보다 20 %일 때 4.3 배가 크다. 시간당 60 m<sup>3</sup>의 주문진 표준사를 배송하는 조건은 펌프 회전수의 가변 한계 때문에 3 % 부피 농도로는 불가능하지만 7 % 배송농도로는 펌프의 분당 회전수가 약 1,450 이면 가능하고 배송농도 20 % 에서는 약 540 분당 회전수로도 가능하였다. 펌프의 분당 회전수가 1,400 일 때, 배송농도 3 % 조건의 배송 생산량은 펌프의 분당 회전수는 540, 배송농도 12 % 조건의 배송 생산량에 비해 작다. 이러한 경향은 배송 생산량을 결정하는 가장 중요한 변수는 배송농도이며, 엔진과 펌프의 시스템 특성인 펌프의 운전 가능한 최소, 최대 회전수 한계 때문에 낮은 배송농도의 최대 배송 생산량은 고농도의 최소 배송 생산량보다 작을 수 있음을 보여준다.



(a) 펌프 분당 회전수와 배송 생산량



(b) 배송 소모동력과 배송 생산량

그림 4. 준설 준설시험루프 시험결과

그림 4(b)는 배송 소모동력과 배송농도, 배송 생산량의 관계를 보여 준다. 배송 소모동력이 증가하면 배송 생산량은 배송농도에 거의 비례하여 증가하였다. 배송농도 20 % 일 때 배송 생산량 증가율은 3

% 배송농도 값보다 약 4 배 크지만 각 배송농도에서는 거의 일정하였다. 배송 소모동력이 90 마력일 때, 3 % 농도로 배송하면 배송 생산량이 시간당 24 m<sup>3</sup> 이었으며, 20 % 농도에서는 배송유속은 0.48 m/s 감소하였지만 배송 생산량은 시간당 133 m<sup>3</sup> 이었다.

펌프 회전수를 일정하게 유지하더라도 배송농도가 증가하면 배송유속이 감소하는 것은 펌프의 효율이 저하되고 배송관내 마찰저항이 증가하기 때문이다.

배송 생산량이 시간당 60 m<sup>3</sup> 되기 위하여 배송 농도 20 %일 때는 약 10 마력이 소요되는데 배송 농도 7 %일 때는 125 마력이 필요한 것은 저 농도 배송조건에서는 대부분의 동력이 물을 송수하는데 소모되고 있음을 의미한다. 배송 소모동력은 배송 생산량보다는 배송유량과 밀접한 관계가 있으며, 배송 소모동력의 효율은 고농도 배송조건에서는 향상되는 것을 알 수 있다.

### 3.1.2 배송유량, 압력과 배송 소모동력

그림 5는 배송 시험한 결과로부터 얻은 배송유량, 펌프의 마노메트릭 압력(토출구 압력-흡입구압력+측정높이 차에 의한 압력)과 펌프의 소모동력의 관계를 보여준다.

펌프의 회전수가 증가할수록 펌프의 마노메트릭 압력, 배송유량과 소모동력은 모두 증가하였는데, 펌프의 분당 회전수가 1,400으로 운전되는 조건에서는 20 % 농도로 배송하면 송수할 때보다 마노메트릭 압력은 27 kPa 증가한 반면, 배송유량이 시간당 250 m<sup>3</sup> 감소하여 배송 소모동력은 25 마력이 감소하였다. 배송농도가 증가하면 배송 소모동력이 오히려 감소하는 경향은 펌프의 회전수가 증가할수록 심화되는데, 그 원인은 배송농도가 증가하면 펌프 및 배송관 시스템의 마찰저항이 증가하여 펌프가 성능곡선(performance curve)를 따라 유량과 압력이 변하면서 운전되는 원심펌프의 특성 때문이다. 배송관 시스템과 펌프 회전수가 일정하게 유지될 때는 송수 조건에서 최대 동력이 소모되는 것을 알 수 있다.

그러므로 준설 현장에서는 송수에서 배송으로 전환하는 운전조건은 엔진의 일정 동력 한계(Constant power limit) 또는 토크 한계 곡선(Torque limit curve)을 따라 엔진이 운전되므로 배송속도를 배송관내 입자의 침강한계속도보다 빠르게 유지할 수 있으면 펌프가 흡입할 수 있는 최대 한계까지 배송할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 고농도 배송에서 송수로 전환하는 운전조건은 배송 소모동력이 증가하므로 배송조건에서 엔진 동력의 여유(margin)는 확보되어 있어야 한다.

배송관의 중간부분에서 과열이 발생하는 경우에도 배송관 시스템의 저항이 감소하여 배송유량은 증가하므로 배송 동력이 증가하는 조건이 된다.

표 2에 배송유량이 시간당 545 m<sup>3</sup> 과 675 m<sup>3</sup> 인 두 조건에서의 배송시험 결과를 비교하였다.

배송유량을 시간당 545 m<sup>3</sup> 으로 유지하기 위하여 펌프의 회전수는 물을 송수할 때 분당 850, 배송농도 20 %일 때 분당 1,030 이 필요하였으며, 배송유량을 시간당 675 m<sup>3</sup> 으로 유지하기 위하여 송수할 때 1,030, 배송농도 20 %일 때 1,400 이 필요하였다.

배송유량이 시간당 545 m<sup>3</sup> 인 조건에서 송수할 때 소모동력보다 20 % 농도로 배송할 때 소모동력이 16 마력 크고, 배송유량이 시간당 675 m<sup>3</sup> 인 조건에서는 43 마력 크다.

이것은 배송유량은 일정하게 유지하면서 배송농도를 증가하기 위하여는 펌프 및 배송관 마찰저항이 증가하므로 펌프의 회전수도 증가시켜야 한다. 따라서 배송유량, 배송농도와 펌프의 회전수는 연계하여 조절해야 한다는 것을 알 수 있다.

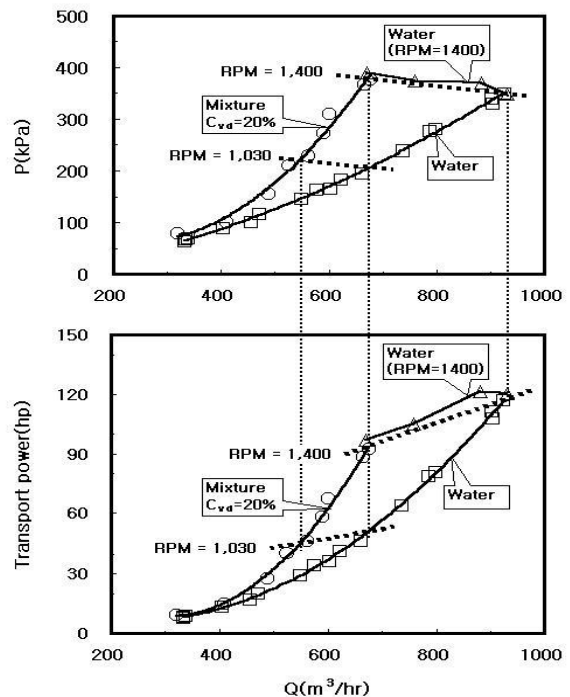


그림 5. 배송 유량, 압력과 소모동력

표 2. 배송 농도와 펌프의 운전 조건

표준사의 부피농도(%)	혼합물 배송유량: 545 m <sup>3</sup> /hr			혼합물 배송유량: 675 m <sup>3</sup> /hr		
	마노메트릭 압력(kPa)	소모동력 (hp)	펌프의 분당 회전수 (rpm)	마노메트릭 압력(kPa)	소모동력 (hp)	펌프의 분당 회전수 (rpm)
0	142	28	850	201	49	1,030
12	217	43	1,030	338	83	1,320
20	220	44	1,030	376	92	1,400

### 3.2 결과 분석

표 3 에 배송시험 결과 중 펌프의 분당 회전수가 540, 600, 800, 1,000, 1,200, 1,400 인 조건을 분석하여 요약하였다. 최대 배송 생산량은 펌프 회전수가 분당 1,400 이고 배송농도가 20 % 일 때 시간당 134 m<sup>3</sup> 이었고, 최소 배송 생산량은 펌프 회전수가 분당 540 이고 3 % 배송농도 조건에서 시간당 11 m<sup>3</sup> 이었다. 배송농도가 20 % 일 때, 펌프의 회전수가 분당 540 에서 1,400 으로 증가하면 배송 생산량은 2.1 배 증가하였지만 소모동력은 약 10 배 증가하여, 단위 소모 마력당 배송 생산량은 오히려 약 1/5 로 감소하였다. 단위 소모 마력당 최대 배송 생산량은 펌프의 회전수가 분당 540 이고 20 % 배송농도 조건에서 6.9 m<sup>3</sup>/hr/hp 이었고, 펌프의 회전수가 분당 1,400 이고 3 % 배송농도 조건에서 가장 작은 0.3 m<sup>3</sup>/hr/hp 이었다. 단위 소모 마력당 배송 생산량은 배송농도 3 % 일 때보다 20 % 일 때 펌프 회전수와 관계없이 5 - 6 배 정도 증가하였다.

그림 6(a)는 배송농도와 배송 생산량의 관계를 보여준다. 배송 생산량은 배송 농도에 비례하여 증가하며 배송 생산량 증가율은 펌프 회전수와 거의 비례하였다. 펌프의 회전수가 분당 540 인 경우에는 배송농도가 증가하면 배송 생산량 증가율이 다소 감소하지만 펌프의 회전수가 분당 1,400 인 경우에는 기울기가 거의 일정해졌다. 배송 생산량은 펌프의 회전수를 높여서 유속을 빠르게 하거나 배송농도를 진하게 하면 증가하였다.

그림 6(b)는 배송속도와 단위 소모 마력당 배송 생산량 관계를 보여주고 있다. 배송속도가 증가할수록 단위 소모 마력당 배송 생산량은 감소하여 소모동력의 배송효율이 저하되었는데, 배송농도가 작을수록 이러한 경향은 심화되었다. 배송농도를 증가시키면 배송 생산량이 증가하고 소모동력의 효율도 증가하는 것을 알 수 있다. 배송속도가 매우 빨라지면 단위 소모 마력당 배송 생산량의 감소가 둔감해지는데, 이것은 모래입자가 배송관 내에 거의 균질하게 분포하는 유사 균질 흐름(Pseudo-homogeneous flow)이 되면서 배송관내에서 발생하는 마찰손실에 미치는 모래입자의 상대적인 영향(relative solid effect)이 작아지기 때문이다(Wilson 등, 1997).

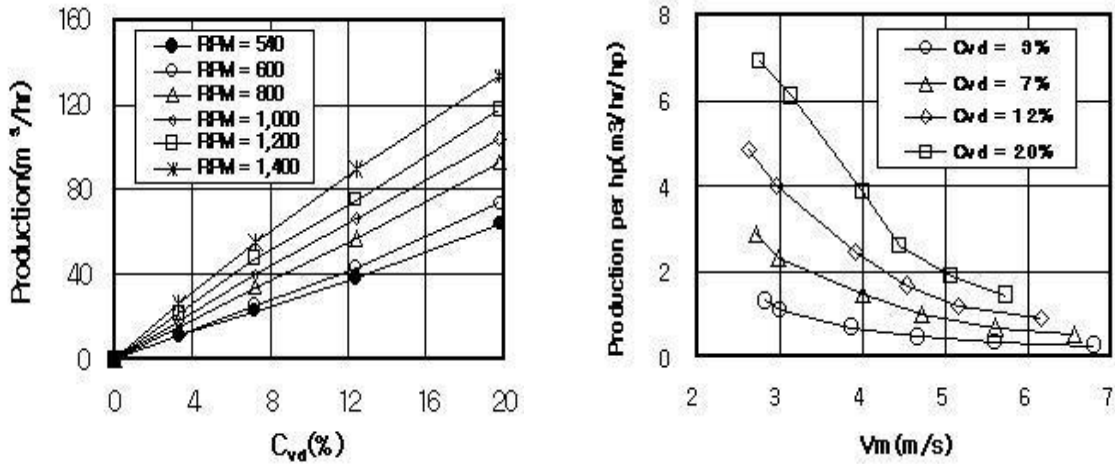
표 3. 배송 소모 동력과 배송 생산량 분석

펌프의 회전수(rpm)	540					600					800					1,000					1,200					1,400				
	0	3	7	12	20	0	3	7	12	20	0	3	7	12	20	0	3	7	12	20	0	3	7	12	20	0	3	7	12	20
배송속도(m/s)	2.9	2.8	2.7	2.6	2.8	3.2	3.0	3.0	3.0	3.1	4.3	3.9	4.0	3.9	4.0	5.6	4.7	4.7	4.5	4.5	6.7	5.6	5.6	5.1	5.1	7.9	6.8	6.5	6.2	5.7
배송유량(m <sup>3</sup> /hr)	340	333	318	310	324	378	355	352	350	370	510	455	470	460	470	660	550	555	535	525	789	660	660	605	595	925	800	770	725	675
펌프의 마노메트릭 압력(kPa)	67	70	69	71	79	80	84	86	85	90	132	134	135	140	141	195	195	204	205	210	277	276	288	286	285	349	365	374	369	376
배송 소모 동력 (bhp, hp)	8.3	8.4	8.0	7.9	9.3	11	11	11	11	12	24	22	23	23	24	47	39	41	40	40	79	66	69	63	62	117	106	104	97	92
배송 생산량(m <sup>3</sup> /hr)	0	11	23	38	64	0	12	25	43	73	0	15	34	57	93	0	18	40	66	104	0	22	48	75	118	0	26	55	90	134
단위 소모 마력당 배송 생산량 (m <sup>3</sup> /hr/hp)	0	1.3	2.9	4.8	6.9	0	1.1	2.3	4.0	6.1	0	0.7	1.5	2.5	3.9	0	0.5	1.0	1.7	2.6	0	0.3	0.7	1.2	1.9	0	0.3	0.5	0.9	1.5

그림 6 으로부터 배송 생산량을 극대화하면서 배송 소모동력의 효율을 올리기 위해서는 펌프의 회전 수와 배송농도를 최대로 증가시켜야 하는 것을 알 수 있다. 그러나 펌프가 최대 회전수로 운전되는 조

건에서 배송농도를 증가시킬 때에는, 펌프와 배송관에서 마찰손실이 증가하여 감소하는 배송유속이 흙의 종류, 배송관 시스템 등에 따라 변화하는 한계유속(critical velocity)보다 빠르도록 해야 한다.

준설 현장에서는 배송속도와 배송농도를 결정할 때, 배송 소모동력의 효율뿐만 아니라 동력 시스템(엔진 또는 전동 모터)의 특성, 배송토량과 공사기간, 부대비용 등을 종합적으로 고려해야 한다.



(a) 부피농도와 배송 생산량 (b) 펌프회전수와 단위 마력당 배송 생산량  
 그림 6. 배송 농도, 펌프의 회전수와 배송 생산량, 단위 소모 마력당 배송 생산량 관계

배송 소모동력은 펌프 및 배송관 시스템의 특성, 배송농도 등 많은 변수와 관련되지만, 식(4)와 같이 원심펌프의 특성 때문에 회전수에 관한 3 차식으로 간략하게 표현할 수 있다(Matousek, 1997). 식 (4)에서 P는 배송소모동력(hp)이고, x는 펌프의 회전수(rpm)이다. 배송 생산량은 배송농도에 비례하여 증가하며, 그 배송 생산량 증가 기울기는 펌프 회전수와 농도의 함수로 표현되므로 펌프의 회전수와 배송농도를 변수로 배송 생산량을 식(5)와 같이 표현할 수 있다(Lee 등, 2004). 식 (5)에서 Q는 배송 생산량(m³/hr) 이고, x는 펌프의 회전수(rpm)이고, y는 모래의 부피농도(%)이다.

$$P(x) = \alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x \tag{4}$$

$$Q(x, y) = (\beta_1 x + \beta_2 xy + \beta_3 y) y \tag{5}$$

$$R(x, y) = \frac{Q(x, y)}{P(x)} = \frac{(\beta_1 x + \beta_2 xy + \beta_3 y) y}{\alpha_1 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x} \tag{6}$$

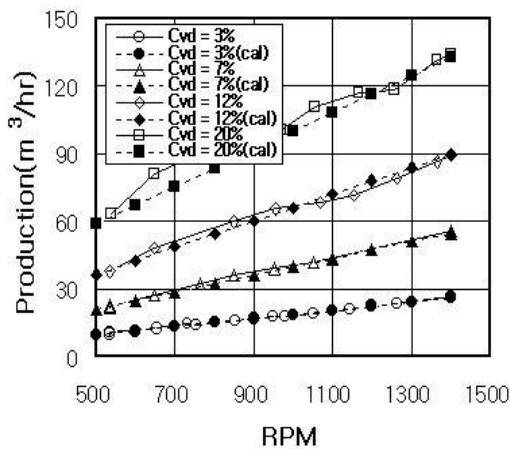


그림 7. 시험 결과와 식(4)의 결과 비교

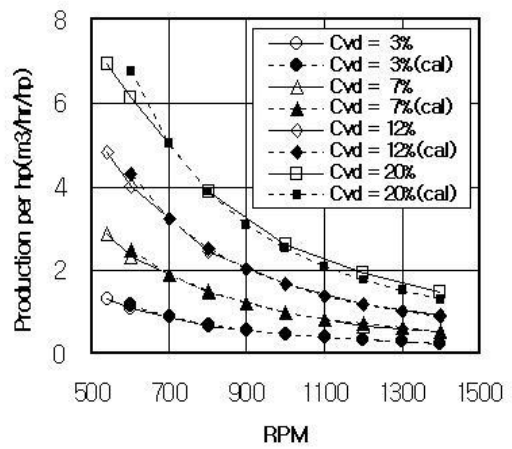


그림 8. 시험결과와 식(6) 결과 비교

루프시험결과와 식(5)으로부터 계산된 결과를 그림 7에 비교하였다. 단위 소모 마력당 배송 생산량은 식(5)을 식(4)로 나눈 식(6)과 같다. 식 (4)의 계수  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  와 식 (5)의 계수  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  는 소수의 다른 조건에서 배송 시험한 결과만으로 최소제곱법(the method of least squares)을 이용하여 결정할 수 있으며, 이들 식들을 이용하면 조절 가능한 펌프의 회전수 및 배송 농도 범위 내에서 배송 소모동력, 배송 생산량과 단위 소모 마력당 배송 생산량을 추정할 수 있다. 그림 8은 시험결과와 식(6)의 계산 결과를 비교하여 도시한 것이다.

#### 4. 결론 및 제언

본 논문에서는 주문진 표준사-물 혼합물에 대한 준설시험루프 배송시험결과로부터 배송 소모동력과 배송 생산량 관계를 여러 배송농도, 배송속도에서 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펌프 회전수의 증가는 소모동력과 배송유속, 배송 생산량을 모두 증가시키는데, 소모동력 대비 배송 생산량은 감소시킨다. 배송농도를 진하게 하면 배송유량(배송속도)는 감소하지만 배송 생산량과 소모 동력대비 배송 생산량이 증가하였다.
- 2) 배송 생산량은 펌프는 고속 회전하고 배송농도는 고농도일 때 최대가 된다. 배송 생산량을 펌프의 회전수와 배송농도의 간략한 3차 관계식을 도출하였으며, 시험배송결과로부터 각 계수들을 결정할 수 있었다.
- 3) 배송 소모동력의 효율이 가장 좋은 조건과 배송 생산량이 최대인 조건은 일치하지 않으므로 실무에서는 배송 시스템(엔진, 펌프, 배송관)의 특성과 배송토량과 공사기간과 관련 부대비용 등을 적절하게 고려하여 배송 조건을 결정해야 한다.

향후 배송시험루프를 이용하여 여러 종류의 흙을 배송시험하고, 그 결과들을 주문진 표준사 시험결과와 비교하여 흙의 종류가 배송에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 또한, 흙-물 혼합물의 배송관내 흐름 메카니즘에 대한 이론과 시험적인 고찰이 수행될 필요가 있다.

#### 참고문헌

1. Bray, R. N., Bates, A. D., Land, J. M.(1997), *Dredging a Handbook for Engineers*. Anold, U.K.
2. Clift, R., Wilson, K. C., Addie, G. R., Carstens, M. R.(1982), "A mechanistically-based method of scaling pipeline tests for settling slurries". *Proc. Hydrotransport 8, BHRA Fluid Engineering*, Cranfield, UK, pp. 91-101.
3. Gillies, R. G.(1993), *Pipeline Flow of Coarse Particle Slurries*. Doctorial thesis, UMI Dissertation Services, pp 56-81.
4. Herbich, J. B.(1992), *Handbook of Dredging Engineering*. McGraw Hill, New York.
5. Lee, M. S., Matousek, V., Chung, C. K., Lee, Y. N.(2003), "Hydraulic transport of Jumoonjin sand-experiments in Hyundai dredging test loop". *Proc. CEDA dredging day 2003*, Amsterdam, The Netherlands, pp 165-174.
6. Lee, M. S., Matousek, V., Chung, C. K., Lee, Y. N.(2004), "Pipe size effect of hydraulic transport of Jumoonjin sand-experiments in a Dredging Test Loop". *Proc. WODA dredging conference 2004*, Hamburg, German, A11-2
7. Matousek, V.(1997), *Flow Mechanism of Sand-Water Mixtures in Pipelines*. Doctorial thesis, Delft Univ. Press, pp 73-144.
8. Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., Clift, R.(1997), *Slurry Transport Using Centrifugal Pumps*. Blackie A & P, London, pp 50-152.